

УДК 621.771.06

**Ю. Д. МУЗЫКИН, А. В. ГАЙДАМАКА, В. В. ТАТЬКОВ, А. А. РЯЗАНОВ****ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ МИКРОТВЕРДОСТИ АКТИВНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗУБЬЕВ РЕДУКТОРА ВЕРТИКАЛЬНЫХ ВАЛКОВ СТАНА «СЛЯБИНГ 1150» ПАО «ЗАПОРІЖСТАЛЬ»**

Рассмотрены особенности условий эксплуатации механических приводов заготовочных станов и показано, что в условиях прямой транзитной прокатки в тандеме с непрерывным тонколистовым станом горячей прокатки 1680, технологический процесс может быть реализован только при условии высокой надежности работы зубчатых передач. Для контроля за их техническим состоянием предложено в качестве оценочного критерия использовать изменение микротвердости рабочих поверхностей зубьев, которое может быть установлено только экспериментально. Для проведения этих исследований предложен модифицированный ротatableльный центральный композиционный план, который в отличие от базового, несущественно увеличивает объем испытаний, позволяет строить не только трехпараметрическую модель, но и однопараметрические, которые существенно расширяют информативность полученных результатов. Проводя сопоставительный анализ динамики изменения микротвердости активных поверхностей зубьев, становится возможным в режиме «online» определять остаточный ресурс работы зацепления, а, следовательно, предотвращать аварийные ситуации.

**Ключевые слова:** стан слябинг, зубчатая передача, диагностика, распределение, планирование эксперимента, остаточный ресурс.

**Ю. Д. МУЗИКІН, А. В. ГАЙДАМАКА, В. В. ТАТЬКОВ, О. А. РЯЗАНОВ****ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА ДИНАМІКИ ЗМІНИ МІКРОТВЕРДОСТІ АКТИВНИХ ПОВЕРХНІ ЗУБІВ РЕДУКТОРА ВЕРТИКАЛЬНИХ ВАЛКІВ СТАНУ «СЛЯБІНГ 1150» ПАТ «ЗАПОРІЖСТАЛЬ»**

Розглянуто особливості умов експлуатації механічних приводів заготовчих станів і показано, що в умовах прямої транзитної прокатки в тандемі з безперервним тонколистовим станом гарячої прокатки 1680, технологічний процес може бути реалізовано тільки за умови високої надійності роботи зубчастих передач. Для контролю за їх технічним станом запропоновано в якості критерія оцінки використовувати зміну микротвердості робочих поверхонь зубців, яке може бути встановлено тільки експериментально. Для проведення цих досліджень запропоновано модифікований ротабельний центральний композиційний план, який на відміну від базового, незначно поширюючи обсяг випробувань, дозволяє будувати не тільки трьох параметричні моделі, але і одно параметричні, котрі суттєво розширюють інформативність отриманих результатів. Виконуючи порівняльний аналіз динаміки зміни микротвердості активних поверхонь зубців, стає можливим у режимі «online» визначати остаточний ресурс роботи зацеплення і таким чином запобігати аварійних ситуацій.

**Ключові слова:** стан слябінг, зубчаста передача, діагностування, розподілення, планування експерименту, остаточний ресурс.

**Yu. D. MUZYKIN, A. V. HAYDAMAKA, V. V. TATKOV, A. A. RYAZANOV****EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF THE DYNAMICS OF CHANGES IN THE MICROHARDNESS OF THE ACTIVE SURFACES OF THE TEETH OF THE GEARBOX OF THE VERTICAL ROLLS OF THE MILL "SLABING 1150" PJSC "ZAPORIZHSTAL"**

The features of the operating conditions of mechanical drives of blank mills are considered and it is shown that in the conditions of direct transit rolling in tandem with a continuous thin-sheet hot rolling mill 1680, the technological process can be implemented only if the gears are highly reliable. To monitor their technical condition, it is proposed to use a change in the microhardness of the working surfaces of the teeth as an evaluation criterion, which can only be established experimentally. To conduct these studies, a modified rotatable central compositional plan was proposed, which, unlike the basic one, insignificantly increases the scope of tests, allows constructing not only a three-parameter model, but also one-parameter ones, which significantly expand the information content of the results. Carrying out a comparative analysis of the dynamics of changes in the microhardness of the active surfaces of the teeth, it becomes possible to determine the residual life of the engagement in the online mode, as well, hence prevent emergency situations.

**Key words:** slab mill, gear transmission, diagnostics, distribution, experiment planning, residual resource.

**Введение.** Сравнительный анализ условий работы механических приводов различного прокатного оборудования показал, что наиболее тяжелые условия наблюдаются в заготовочных станах, к которым относится «Слябинг 1150». Для этого оборудования характерны высокие нагрузки со значительной динамической составляющей, широкий спектр рабочих температур, значительный уровень низко- и высокочастотных вибраций, несоответствие класса кинематических пар требованиям статической определимости системы. Объясняется это как особенностями конструктивного решения слябинга, так и технологическими режимами его работы, главными из которых являются: наличие двух прокатных клетей, между которыми существует силовое замыкание через раскат в виде подпора или

натяжения; реверсивный режим работы стана, приводящий к неравномерности движения больших масс.

При движении раската по клетям стана в одном направлении толкающей может являться вертикальная клеть, где происходит снятие уширения и формирование боковых граней сляба, в другом направлении толкающей является горизонтальная клеть, где происходит обжим сляба. В обоих случаях, в силу особенностей компоновки стана, возможна как одиночная прокатка в одной клетке, так и совместная прокатка в двух клетях.

В момент реверса, когда направление вращения горизонтальных и вертикальных валков меняется на противоположное, происходит размыкание и новое замыкание во всех кинематических парах. Это

© Ю. Д. Музыкин, А. В. Гайдамака, В. В. Татьков, А. А. Рязанов, 2019

вызывает ударные динамические нагрузки, разрушающие контактирующие поверхности, а, следовательно, увеличивающие зазоры в сопряжениях. Именно разность скоростей элементов в кинематической паре в момент контакта является причиной дополнительной динамической нагрузки [1, 2].

Поэтому требование к обеспечению надежной работы «Слябинга 1150» является необходимым условием для эффективной работы в тандеме с непрерывным тонколистовым станом горячей прокатки 1680 в цехе ЦГПТЛ, который при условии прямой транзитной прокатки сляба обеспечивает существенную экономию энергоресурсов на ПАО «Запорожсталь» [3].

**Цель работы. Постановка задачи.** Одним из наиболее проблематичных узлов механического привода являются зубчатые передачи, которые в зависимости от условий работы могут испытывать различные виды изнашивания: механическое, молекулярно-механическое, коррозионно-механическое. Характер доминирующего вида разрушения зависит от конкретных условий работы, которые в большинстве случаев недетерминированы, а, следовательно, их влияние на рассматриваемые процессы можно оценивать только в вероятностной постановке. Поэтому в таких случаях наиболее объективный результат влияния каждого параметра на исследуемую величину может быть получен только экспериментальным путем при условии правильного планирования эксперимента. Составление такого плана испытаний, отвечающего критериям максимальной информативности при условии минимального объема экспериментальной работы, является в каждом конкретном случае актуальной и ответственной задачей.

**Материалы исследований.** Согласно стандарта на цилиндрические эвольвентные зубчатые передачи ГОСТ 21354-87 [4] при оценке технического состояния зацепления используется принцип суперпозиции эксплуатационных параметров, что позволяет реализовать условие линейного суммирования накопленных повреждений. В этом случае, осуществляя мониторинг накопленных повреждений и проводя сопоставительный анализ динамики их изменения, становится возможным по законам экстраполяции определять остаточный ресурс работы зубчатого зацепления и, следовательно, планировать ремонтные работы, исключая аварийные остановки [5].

Применительно к прокатному оборудованию справедливость данного утверждения была подтверждена экспериментально для силового редуктора чистовой клетки № 5 НТЛС 1680 ЦГПТЛ ПАО «Запорожсталь». Статистические исследования показали, что характер внешней нагрузки, действующей на зубья зацепления, подчиняется нормальному закону распределения, а показатель интенсивности нагружения зубьев соответствует типовому среднему равновероятному режиму [6]. Полученные результаты исследований можно

использовать и для других видов прокатного оборудования, в том числе и для стана «Слябинг 1150», так как условия нагружения силового редуктора являются интегральной характеристикой всего стана в целом.

Многочисленные наблюдения за работой силовых редукторов показали, что в подавляющем большинстве случаев разрушения зубьев носят усталостный характер, который связан с выкрашиванием боковых поверхностей зубьев. Согласно контактно-гидродинамической теории усталостного разрушения [7] при высоких контактных давлениях и обильной смазке за счет скольжения сопряженных поверхностей происходит развитие микротрещин и образование лунок (pitting). Проявление этого эффекта усиливается в крупномодульных зубчатых колесах. Таким образом, надежность и долговечность работы силовых редукторов прокатных станов зависит как от эксплуатационных параметров нагружения, которые являются недетерминированными, так и от технологических параметров конструктивного решения, которые являются детерминированными.

Для определения влияния всех перечисленных факторов на надежность и долговечность работы силовых редукторов необходимо выбрать объективный критерий оценки, фиксирующий истинное техническое состояние редуктора в режиме «online». Существует множество методов неразрушающего контроля технического состояния редукторов, однако, учитывая габаритные и весовые параметры, а также компоновку и условия работы привода, предлагается в качестве оценочного критерия использовать изменение микротвердости рабочей поверхности зуба [8, 9]. Так как рассмотренные параметры в процессе работы оказывают влияние на изменение твердости рабочей поверхности зубьев, с высокой степенью вероятности можно предположить, что оценочный критерий будет подчиняться нормальному закону распределения. Такое утверждение базируется на центральной предельной теореме для случайной величины, которая представляет результат воздействия большого числа независимых параметров [10]. В этом случае для экспериментального описания динамики изменения твердости рабочих поверхностей контактирующих зубьев наиболее эффективным является использование ротатбельного центрального композиционного плана (РЦКП), который позволяет получить изучаемую функцию отклика в виде полинома второго порядка.

Опыт использования данного плана показывает, что наиболее полным в условиях оптимальных затрат на проведение испытаний является трехфакторный эксперимент на трех уровнях. Однако три уровня не позволяют построить однопараметрические зависимости, которые нужны для изучения физики исследуемого процесса. Для этого желательно планировать эксперимент на пяти уровнях за счет использования модифицированного ротатбельного центрального композиционного плана (МРЦКП), который, не увеличивая существенно объем

испытаний, значительно расширяет объем полученной информации. Наличие пяти точек при построении однопараметрических зависимостей существенно повышает ее информативность, что особенно важно для нелинейных функций. Таким образом, планирование эксперимента – это процедура выбора числа и условий проведения опытов, необходимых для формализации действий при проведении испытаний и обработке результатов.

Для иллюстрации использования плана МРЦКП рассмотрена задача экспериментального определения скорости изменения микротвердости активной поверхности зубьев редуктора вертикальных валков стана «Слябинг 1150» обжимного цеха ПАО «Запорожсталь».

При очередном разрушении зубьев промежуточной шестерни редуктора привода вертикальных валков стана «Слябинг 1150», изготовленного на НКМЗ согласно чертежа 2-404352, была проведена экспертиза материала фрагмента разрушенного зуба. Исследования проведены лабораторией металловедения ПАО «Запорожсталь». Согласно чертежа материал шестерни – сталь 20ХН3А ГОСТ 4543-71, поковка гр. III ГОСТ 8479-70, твердость 250-310 НВ. Цементация по профилю зуба на глубину 2,0-2,4 мм, твердость 55-63 HRC.

Характерные следы разрушения позволили установить причины потери прочности – усталостный излом.

Результаты проверки химического состава материала шестерни представлены в таблице (исследование № 9810 от 15.04.2019).

Таблица. Химический состав материала шестерни

Химический элемент	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo
Содержание химического элемента в металле зуба. % по массе	0,42	0,67	0,29	0,016	0,010	0,72	1,38	0,11	0,19
Содержание химического элемента в стали марки 20ХН3А согласно ДСТУ 7806:2015. % по массе	0,17-0,24	0,30-0,60	0,17-0,37	Не более		0,60-0,90	2,75-3,15	Не более 0,30	-
				0,025	0,025				
Содержание химического элемента в стали марки 40ХН2МА согласно ДСТУ 7806:2015. % по массе	0,37-0,44	0,50-0,80	0,17-0,37	Не более		0,60-0,90	1,25-1,65	Не более 0,30	0,15-0,25
				0,025	0,025				

Химический состав металла детали соответствует стали марки 40ХН2МА вместо указанной в чертеже стали марки 20ХН3А согласно требований ДСТУ 7806:2015.

Контроль микроструктуры и твердости материала зуба выполнен по контуру на глубину 21 мм от вершины показал, что материал имеет упрочненный слой, представляющий собой отпускаемый мартенсит твердостью 47 HRC. Микроструктура сердцевины зуба состоит из сорбитообразного перлита твердостью 363НВ.

По результатам выполненных исследований вывод лаборатории следующий: материал шестерни сталь 40ХН2МА, что не соответствует требованиям чертежа; твердость поверхностного слоя зуба 47 HRC и твердость основного металла зуба 363НВ также существенно отличаются от требований чертежа. Поэтому, учитывая линейные размеры зубчатого колеса, у которого модуль зацепления  $m = 16$  мм, число зубьев  $Z = 81$ , наружный диаметр  $d_a =$

1328 мм и шероховатость поверхности зуба  $R_a 1,6$ , становится очевидным, что при экспериментальном определении скорости изменения твердости рабочих поверхностей зуба в качестве варьируемых параметров следует принять: начальную твердость поверхности зуба, шероховатость активной поверхности зуба, вязкость используемого смазочного масла. Каждый из указанных параметров является случайной величиной, но может быть строго определен в конкретных условиях. При этом параметры, характеризующие условия работы обжимного стана, которые подчиняются нормальному закону распределения, могут рассматриваться как постоянная составляющая эксперимента.

Искомая функция отклика представляет математическую модель, связывающую изучаемый параметр  $Y$  с независимыми варьируемыми параметрами  $X$ . Так как характер исследуемой модели заранее не определен, функция отклика представлена в виде полинома второго порядка.

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{i,j=1}^k b_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} X_i^2,$$

где  $b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii}$  – коэффициенты при переменных;  $X_i, X_j$  – переменные в кодированной форме, связанные с их натуральным значением.

Параметры модели, то есть значения коэффициентов уравнения регрессии, имеют вид

$$b_0 = d_1 \sum_{u=1}^N y_u - d_2 \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^N X_{iu}^2 y_u;$$

$$b_i = d_3 \sum_{u=1}^N X_{iu} y_u;$$

$$b_{ij} = d_4 \sum_{u=1}^N (X_i X_j)_u \cdot y_u; \quad (i \neq j),$$

$$b_{ii} = d_5 \sum_{u=1}^N X_{iu}^2 y_u,$$

где  $d_1, d_2, \dots, d_7$  – константы для вычисления параметров модели.

Определив таким образом значения коэффициентов регрессии, производится оценка дисперсии параметров модели

$$S^2(b_0) = d_1 S_b^2; \quad S^2(b_i) = d_3 S_b^2;$$

$$S^2(b_{ij}) = d_4 S_b^2;$$

$$S^2(b_{ii}) = d_7 S_b^2;$$

где  $S_b^2$  – дисперсия воспроизводимости, которая определяется в центре плана, где выполняются параллельные эксперименты

$$S_b^2 = \frac{1}{n_0 - 1} \sum_{u=1}^{n_0} (y_{0u} - \bar{y}_0)^2;$$

$\bar{y}_0$  – среднее значение выхода искомого параметра

$$\bar{y}_0 = \frac{1}{n_0} \sum_{u=1}^{n_0} y_{0u}.$$

Оценка значимости полученных коэффициентов регрессии может быть проведена по  $t$ – критерию Стьюдента, позволяющему для каждого параметра модели вычислить доверительный интервал для заданного уровня значимости

$$\Delta(b) = \pm t(\alpha, f_1) S(b),$$

где  $\Delta(b)$  – доверительный интервал для параметра;

$S(b)$  – стандартное отклонение параметра

$$S(b) = \sqrt{S^2(b)},$$

$t(\alpha, f_1)$  – критерий Стьюдента, который определяется в зависимости от числа

экспериментальных точек  $N$  и требуемого уровня значимости  $\alpha$ .

В соответствии с доверительными интервалами, посчитанными для каждой группы коэффициентов  $b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii}$ , можно произвести округление значений параметров модели, если они первого порядка малости, либо некоторые из них вообще выбросить, если они второго порядка малости.

Используя полученную зависимость в виде полинома второго порядка, можно определить значение функции отклика во всем интервале варьирования независимых переменных.

Для составления плана проведения эксперимента необходимо перейти от натуральной формы записи варьируемых параметров к кодированной. Для этого требуется произвести оценку границы области определения каждого фактора, а также выбрать основной уровень, который соответствует центру плана как многомерной точки в факторном пространстве. Кроме того, интервал варьирования не может быть меньше ошибки, с которой фиксируется уровень фактора.

Число уровней варьирования каждого фактора составляет пять:

Верхний уровень	+1	$X_i^B$
Нижний уровень	-1	$X_i^H$
Основной уровень	0	$X_i^0 = \frac{X_i^B + X_i^H}{2}$
Шаг варьирования	$\Delta$	$\Delta X_i = \frac{X_i^B - X_i^H}{2}$
Звездные точки	$+\alpha X_i$ $-\alpha X_i$	$X_i^0 + \alpha \Delta X_i$ $X_i^0 - \alpha \Delta X_i$

Рассматриваемый план РЦКП реализуется в виде матрицы планирования, основу которого составляет «ядро», представляющее полный факторный эксперимент (ПФЭ), к которому добавляются «звездные» точки. Координаты точек плана РЦКП в кодированном виде:

$$1(-1-1-1); 2(+1-1-1); 3(-1+1-1); 4(+1+1-1); 5(-1-1+1); 6(+1-1+1); 7(-1+1+1); 8(+1+1+1); 9(-\alpha 00); 10(\alpha 00); 11(0-\alpha 0); 12(0+\alpha 0); 13(00-\alpha); 14(00+\alpha); 15\dots 20(000).$$

Полученная функция отклика в виде полинома второго порядка позволяет исследовать трехпараметрическую зависимость, которая соответствует экспериментально полученным значениям в контролируемых точках плана. Однако для построения однопараметрических зависимостей типа  $Y = f(X_1)$  при  $X_2 = const$  и  $X_3 = const$ , когда варьирование переменной согласно РЦКП осуществляется на трех уровнях явно недостаточно и для построения экспериментальной кривой искомой функции количество уровней нужно увеличить. Поэтому, сохраняя принцип композиционности, к матрице РЦКП добавляется еще 6 точек, которые лежат на пересечении осей переменных параметров с

плоскостями куба, описывающими план ПФЭ. Такой план называется модифицированным ротатабельным центральным композиционным планом (МРЦКП). Обладая всеми достоинствами предыдущего плана, за счет незначительного увеличения экспериментальных точек, МРЦКП существенно увеличивает информативность полученных результатов и позволяет расширить перечень решаемых задач.

На рисунке представлена матрица МРЦКП при числе переменных факторов равном трем, которая последовательно включает в себя ПФЭ, РЦКП и дополняет их характерными точками, соответствующими линейной модели исследуемого процесса.

Координаты дополнительных точек в кодированном виде:

$$21(-10\ 0); 22(+10\ 0); 23(0-1\ 0); \\ 24(0+1\ 0); 25(0\ 0-1); 26(0\ 0+1).$$

По найденным пяти точкам вдоль каждого параметра строят графические однопараметрические зависимости при двух других фиксированных параметрах, соответствующих точке центра плана. Построенная однопараметрическая зависимость позволяет установить закон изменения искомого параметра в области его монотонного изменения. Построив теоретический график изменения искомого параметра и нанеся на него экспериментальные точки, можно определить их корреляцию и дополнительно установить адекватность полученной модели, представленной в виде полинома второго порядка, действительному закону исследуемого процесса.

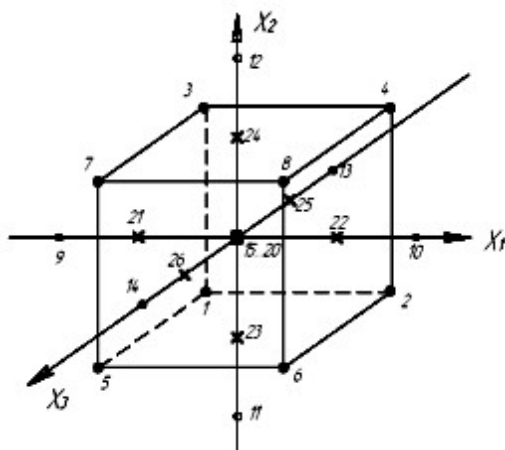


Рис. 1 – Трехфакторный модифицированный ротатабельный центральный композиционный план

● – ядро плана; ○ – звездные точки; ■ – центр плана;  
x – дополнительные точки

Для определения коэффициентов « $b$ » уравнения регрессии используются результаты эксперимента, которые соответствуют точкам (1, 2, 3, ... 20). Произведя оценку значимости полученных коэффициентов регрессии и перейдя от нормализованной формы записи к натуральной модели, получим функцию изменения искомого параметра в зависимости от трех независимых

переменных, которая базируется на экспериментальных результатах.

По последним шести точкам плана эксперимента (21, 22, 23, 24, 25, 26) строятся однопараметрические зависимости изменения твердости поверхности зуба при варьировании одного из переменных параметров и фиксированных значениях двух других, которые соответствуют центру плана.

Фиксируя изменения микротвердости за ограниченный промежуток времени при условии варьирования тремя переменными параметрами согласно плану МРЦКП и принимая во внимание, что суммарное влияние всех параметров, характеризующих режим работы обжимного стана подчиняется нормальному закону распределения, может быть найдена фактическая скорость изменения микротвердости рабочей поверхности зуба. Установив таким образом временную связь, становится возможным при фиксированных крайних значениях микротвердости, выполняя сопоставительный анализ и учитывая законы экстраполяции, определять остаточный ресурс работы зубчатого зацепления в режиме «online», что исключает возможность возникновения аварийных ситуаций.

#### Выводы:

1. Представлены особенности условий работы механического привода заготовочного стана «Слябинг 1150» и показано, что каждый из эксплуатационных параметров является недетерминированным, а, следовательно, в расчетах может рассматриваться только в вероятностной постановке.

2. По результатам статистических исследований показано, что суммарное влияние всех эксплуатационных параметров на надежность и долговечность элементов механического привода подчиняется нормальному закону распределения, а, следовательно, возможно использование принципа линейного суммирования повреждений.

3. Для диагностирования технического состояния зубчатых передач редуктора вертикальных валков стана «Слябинг 1150» предложен оценочный критерий в виде микротвердости активной поверхности зуба. Учитывая габаритные и весовые параметры редуктора и отдельных его элементов, другие традиционные неразрушающие виды контроля становятся неприемлемыми.

4. Представленные результаты лабораторных исследований материала фрагмента разрушенного зуба показали, что разрушение носит усталостный характер. Сравнение технических требований к детали согласочертежа с ее фактическими значениями показало их существенное различие, а, следовательно, необходимость учета влияния начальной твердости рабочей поверхности зуба, шероховатости его обработки, а также вязкости смазывающего масла при оценке скорости изменения микротвердости рабочей поверхности.

5. Для определения скорости изменения микротвердости рабочей поверхности зуба, которая может быть установлена только экспериментальным путем, предложен модифицированный ротатабельный

центральный композиционный план, который по сравнению с базовым, незначительно увеличивая число испытаний, позволяет существенно расширить информативность полученных результатов за счет возможности строить не только трехпараметрическую модель, но также и однопараметрические зависимости.

6. Проводя мониторинг микротвердости активной поверхности зубьев, которая изменяется во времени, а также выполняя сопоставительный анализ динамики рассматриваемого процесса становится возможным определять остаточный ресурс работы зубчатых зацеплений редуктора в режиме «online», а, следовательно, предотвращать их аварийные отказы.

#### Список литературы

1. Целиков А.И. Машины и агрегаты металлургических заводов /А.И. Целиков. – М.: Металлургия, 1988. – 680 с.
2. Динамика процессов прокатки /С.Л. Коцарь, В.А. Третьяков, А.Н. Цупров и др. – М.: Металлургия, 1999. – 255 с.
3. Разработка технологии производства горячекатаных полос толщиной 1,5 мм методом прямой транзитной прокатки по станам слябинг – НТЛС 1680 /В.Т. Тилик, О.Н. Штехно, А.Ю. Путники и др. //Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2002. – Спецвыпуск. – С. 84–87.
4. ГОСТ 21354-87. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет на прочность. – Москва: Из-во стандартов, 1988. – 127 с.
5. Притыкин Д.П. Надежность, ремонт и монтаж металлургического оборудования /Д.П. Притыкин. – М.: Металлургия, 1985. – 368 с.
6. Анализ работы зубчатых передач и пути предупреждения их аварийных отказов на непрерывном тонколистовом стане горячей прокатки 1680 ПАО «Запорожсталь» /Ю.Д. Музыкин, С.В. Мацко, П.П. Москаленко, В.В. Татьков //Вісник НТУ «ХПІ», 2016. – № 30(1202). – С. 42–48.
7. Коднир Д.С. Контактная гидродинамика смазки деталей машин /Д.С. Коднир. – М.: Машиностроение, 1976. – 304 с.
8. Оценка остаточного ресурса крупномодульных зубчатых колес карьерных экскаваторов /С.Л. Иванов, И.Е. Звонарев, Д.И. Шишлянников и др. //Горное оборудование и электромеханика. – 2013. – № 11. – С. 28–33.
9. Исследование поверхностей твердости металла в областях повышенного износа и разрушения деталей горных машин /И.Е. Звонарев, С.Л. Иванов, Д.И. Шишлянников др. //Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2014. – С. 67–76.
10. Дисонсон Н. Статистика и планирование в технике /Н. Дисонсон, Ф. Лион. – М.: Мир, 1981. – 385 с.

#### References (transliterated)

1. Celikov A.I. Mashiny i agregaty metallurgicheskikh zavodov /A.I. Celikov. – Moscow: Metallurgiya, 1988. – 680 p.
2. Dinamika processov prokatki /S.L. Kocar, V.A. Tretyakov, A.N. Cuprov i dr. – Moscow: Metallurgiya, 1999. – 255 p.
3. Razrabotka tehnologii proizvodstva goryachekatanykh polos tolshinoj 1,5 mm metodom pryamoj tranzitnoj prokatki po stanah slyabing – NTLS 1680 /V.T. Tilik, O.N. Shtehno, A.Yu. Putniki i dr. //Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost. – 2002. – Specvypusk. – P. 84–87.
4. GOST 21354-87. Peredachi zubchatye cilindricheskie evolventnye vneshnego zacepleniya. Raschet na prochnost. – Moscow: Iz-vo standartov, 1988. – 127 p.
5. Pritykin D.P. Nadezhnost, remont i montazh metallurgicheskogo oborudovaniya /D.P. Pritykin. – Moscow: Metallurgiya, 1985. – 368 p.
6. Analiz raboty zubchatykh peredach i puti preduprezhdeniya ih avariynykh otkazov na nepreryvnom tonkolistovom stane goryachej prokatki 1680 PAO «Zaporozhstal» /Yu.D. Muzykin, S.V. Macko, P.P. Moskalenko, V.V. Tatkov //Visnik NTU "HP", 2016. – No 30(1202). – P. 42–48.
7. Kodnir D.S. Kontaktnaya gidrodinamika smazki detalej mashin /D.S. Kodnir. – Moscow.: Mashinostroyeniye, 1976. – 304 p.
8. Ocenka ostatocnogo resursa krupnomodulnykh zubchatykh koles karemykh ekskavatorov /S.L. Ivanov, I.E. Zvonarev, D.I. Shishlyannikov i dr. //Gornoe oborudovanie i elektromekhanika. – 2013. – No 11. – P. 28–33.
9. Issledovanie poverhnostej tverdosti metalla v oblastyakh povyshennogo iznosa i razrusheniya detalej gornykh mashin /I.E. Zvonarev, S.L. Ivanov, D.I. Shishlyannikov dr. //Vestnik PNIPU. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo. – 2014. – P. 67–76.
10. Disonsn N. Statistika i planirovanie v tehnikе /N. Disonsn, F. Lion. – Moscow: Mir, 1981. – 385 p.

Поступила (received) 03.11.2019

#### Відомості про авторів /Сведения об авторах/ About the Authors

**Музыкин Юрий Дмитриевич (Музикін Юрій Дмитрович, Muzykin Yuri Dmitrievich)** – кандидат технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры «Детали машин и мехатронных систем»; тел. +38-067-264-56-78; e-mail: muzykin1940@mail.ru

**Гайдамака Анатолий Владимирович (Гайдамака Анатолій Володимирович, Gaydamaka Anatoli Vladimirovich)** – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор, заведующий кафедрой «Детали машин и мехатронных систем»; тел. +38-057-297-14-40; e-mail: gaydamaka.doc@gmail.com

**Татьков Владимир Викторович (Татьков Володимир Вікторович, Tat'kov Vladimir Viktorovich)** – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской части Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», тел. +38-067-735-87-09; e-mail: tatjgov@kpi.kharkov.ua

**Рязанов Алексей Анатольевич (Рязанов Олексій Анатолійович, Ryazanov Alexey Anatolyevich)** заместитель начальника по оборудованию обжимного цеха ПАО «Запорожсталь», г. Запорожье, тел. +38-067-723-42-60; e-mail: aleksey.ryazanov@zaporizhstal.com